

APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN AL AHORRO DE COMBUSTIBLE EN EL TRACTOR

*Pilar Barreiro Elorza y Belén Diezma Iglesias.
Profesoras Titulares*

*Eva Baguena Isiegas.
Ingeniera Agrónoma*

*Dpto. Ingeniería Rural. ETSI Agrónomos. Universidad
Politécnica de Madrid*

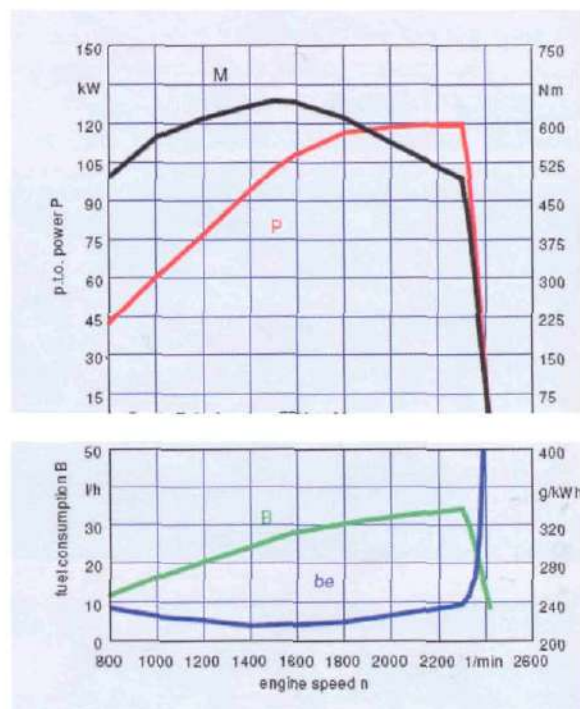
En este artículo se recogen los resultados más llamativos de varios trabajos de investigación publicados en los últimos años relativos al análisis de la eficiencia energética de los vehículos agrícolas: el primero (2002) estudia el efecto de las estrategias de control del motor y las características de las transmisiones en las emisiones nocivas de los motores agrícolas; el segundo (2009), un extenso trabajo de investigación de campo relativo a más de 30.000 horas de utilización en 12 modelos distintos de tractores, está enfocado al análisis de la eficiencia energética y la calidad ambiental del trabajo de los motores con control electrónico en condiciones reales de campo empleando para ello los registros de las unidades electrónicas de control de los tractores; el tercero (2009) muestra las enormes posibilidades de la agricultura de precisión aplicada a la supervisión y control del funcionamiento de los tractores, proponiendo un sistema complejo de adquisición de datos y posicionamiento global diferencial (DGPS) para la realización de mapas que recogen los principales parámetros de funcionamiento del tractor, entre otros del consumo de combustible.

En los próximos años puede producirse un cambio notable en las prestaciones de los tractores derivado del incremento de los sistemas de gestión electrónico del motor y de las transmisiones.

El análisis de los parámetros de funcionamiento de los motores de los tractores agrícolas es fundamental desde el punto de vista económico y medio ambiental. La implementación de microprocesadores en los motores permite la supervisión de sus niveles de carga a lo largo de su vida útil, asimismo, la supervisión continua del consumo de combustible durante la realización de las diversas labores agrícolas, puede aportar una valiosa información en la búsqueda de estrategias de optimización del trabajo en campo y en transporte.



Figura 1. Curvas de motor certificadas.



LAS EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MOTORES DE LOS TRACTORES

Las emisiones nocivas de los motores dependen de las condiciones de funcionamiento del motor. Si el proceso de combustión fuera perfecto, los gases de escape estarían constituidos por dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua y nitrógeno

gaseoso (N_2), aunque generalmente esto no ocurre, produciéndose una variedad de gases de escape: monóxido de carbono (CO), hollín (carbono puro), hidrocarburos (combustible sin quemar, $H_n C_m$), aldehídos (RCHO), óxidos de nitrógeno (NO_x), sin contar con el dióxido y el trióxido de azufre (SO_2 y SO_3) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) en los casos en los que los combustibles contengan trazas de azufre. El hollín (carbono puro) que emite el motor tiene forma de humo visible cuando se emite en cuantías superiores a $120-130 \text{ mg/m}^3$ y se convierte en humo negro para valores superiores a 600 mg/m^3 .

Los motores diesel operan en condiciones de exceso de oxígeno, y de ahí la producción de óxidos de nitrógeno (NO_x), aunque según la uniformidad de la inyección pueden producirse simultáneamente patrones de combustión incompleta que dan lugar al mencionado monóxido de carbono (CO). La cantidad de NO_x puede reducirse realizando la inyección del combustible más tarde, aunque esto incrementa el consumo de combustible por imposibilidad de quemarlo completamente. Por este motivo la posibilidad de re-circular parcialmente los gases de escape, tal y como ocurre en algunos motores, favorece la eliminación del monóxido de carbono limitando las proporciones de óxido de nitrógeno (NO_x) emitidas al ambiente.

El consumo de combustible y las emisiones de un motor dependen fundamentalmente del régimen y del par de motor. Es obvio que los vehículos agrícolas operan bajo una gran variedad de condiciones, y la adecuada selección de la relación de transmisión y el régimen del motor dependen de la experiencia del operario. Se ha comprobado que en numerosas ocasiones los vehículos agrícolas trabajan con marchas más cortas de lo necesario, provocando un régimen elevado en el motor. Los ensayos de campo para el estudio de las emisiones de los motores de vehículos agrícolas son caros y exigentes en tiempo y dinero, y puede decirse que es casi imposible medir y controlar todas las variables que influyen en dichas emisiones, por lo que la simulación aparece como una alternativa factible, ya muy desarrollada en la industria automovilística, pero menos en los estudios de los vehículos y labores agrícolas. Uno de los trabajos de referencia en el mundo del tractor ha sido realizado por Lindgren y Hansson (2002), que proponen una metodología de simulación para estudiar los efectos de las estrategias de control del motor y de las transmisiones en las emisiones de los tractores agrícolas. La metodología de simulación contempla labores de transporte y laboreo, calculando las emisiones instantáneas para diferentes escenarios de carga y régimen del motor respecto a velocidad del vehículo, aceleración... Un resultado general de esta investigación fue la constatación de que las estrategias de conducción y las características de las transmisiones pueden afectar de forma considerable a las emisiones, sin afectar al tiempo

Tabla 1. Diferencias en el consumo de combustible y en las emisiones de gases según los diferentes escenarios de simulación con respecto al escenario de referencia para transporte (tabla superior) y para una labor de gradeo (tabla inferior). Fuente: Lindgren y Hansson (2002).

TRANSPORTE				
Modificación	Diferencia con respecto a la situación de referencia (%)			
	Consumo combustible	CO	NO_x	HC
Disminución del 20% de la reducción final	-2	-10	12	-19
CVT 1400 rpm	-14	-22	13	-37
CVT 1600 rpm	-6	-15	16	-26
CVT 1800 rpm	-2	-10	13	-16
CVT 2000 rpm	0	3	6	-7
LABOREO				
Modificación	Diferencia con respecto a la situación de referencia (%)			
	Consumo combustible	CO	NO_x	HC
Disminución del 20% de la reducción final	0	-1	0	-1
CVT 1400 rpm	-10	-14	3	-22
CVT 1600 rpm	-3	-2	3	-7
CVT 1800 rpm	1	4	-4	2

Tabla 2. Características y número de horas de uso evaluadas en el trabajo de investigación de Juostas y Janulevicius publicado en 2009.

Tractor nº	Potencia y régimen nominales	Horas acumuladas de uso del motor
1	135/2300	2758
2	150/2300	2270
3	150/2300	2021
4	160/2300	2315
5	160/2300	2363
6	200/2300	3997
7	198/2300	451
8	230/2300	4913
9	230/2300	4927
10	231/2300	3237
11	250/2300	1653
12	250/2300	1495



o consumo de combustible de la operación. Se observó que una disminución del 20% a nivel de la reducción final en las ruedas motrices produce una disminución de la cantidad de hidrocarburos y CO emitidos, aunque incrementa la cantidad de óxidos de nitrógeno emitidos durante las operaciones de transporte (Tabla 1). Por otra parte, en este artículo se evalúa el uso de una transmisión continuamente variable (CVT) que mostró

una gran influencia en los niveles de emisiones. Esta transmisión puede ajustarse para obtener la combinación más favorable de régimen y par para cada tipo de carga, mostrando, de acuerdo con la simulación, una disminución en el consumo de combustible y en las emisiones de CO e hidrocarburos, mientras las emisiones de NO_x (muy relacionadas con el par del motor y la temperatura de combustión) aumentaron con el descenso del régimen del motor, tanto en el transporte como en el laboreo. Se observa, por tanto, que la estrategia ha de ser una cuestión de prioridades, porque según estos resultados no es posible reducir los niveles de NO_x y simultáneamente los niveles de HC y CO.

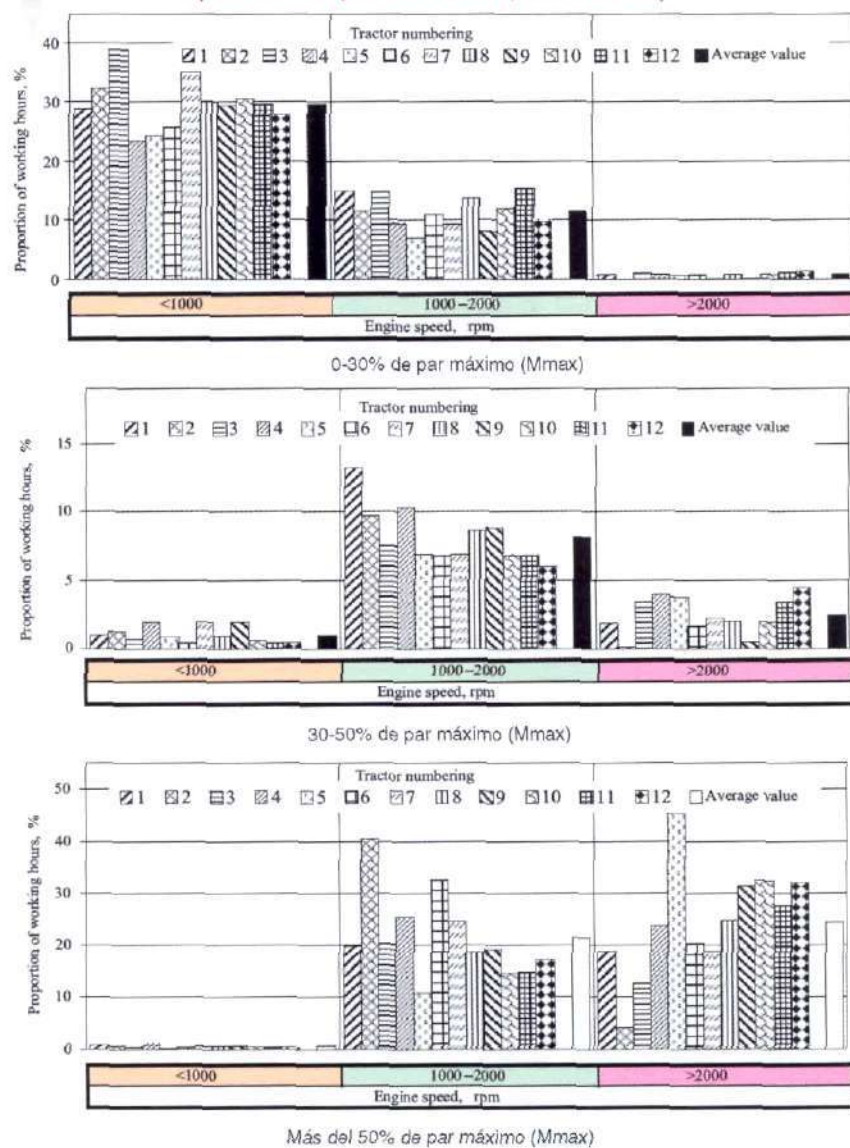
Los valores de régimen de motor que Lindgren y Hansson proponen en 2002 como recomendables, según los resultados de las simulaciones, para reducir los niveles de emisión se sitúan en torno a 1400 rpm. Cabe destacar que algunos de los tractores actualmente comercializados, tales como el Fendt 211, recientemente evaluado en un ensayo de campo por las autoras de este artículo, tienden a ceñirse a este valor recomendado. Esto demuestra que las conclusiones que se obtienen en estos trabajos de investigación llegan a derivar en recomendaciones prácticas de uso de gran utilidad para los fabricantes de tractores.

ADQUISICIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES

El trabajo que se resume en este apartado (Juostas y Janulevicius, 2009), ha evaluado 12 tractores con potencias entre 135 y 250 CV, todos ellos con un régimen nominal de 2300 rpm y un número de horas de utilización de motor acumuladas entre 451 y 4927 (ver Tabla 2), empleando para ello el procedimiento de acceso a las bases de datos de las ECUs.

En la Figura 1 se muestran las curvas características del motor de uno de los modelos estudiados (nótese que se trata de un motor EURO II y no de los actuales EURO IV, aunque la metodología expuesta es altamente valiosa). En dichas curvas se alcanza la potencia máxima del motor a 1800 rpm, correspondiendo la potencia nominal a un régimen de motor de 2300

Figura 2. Resultados publicados por Juostas y Janulevicius en 2009, relativos a un total de 32400 horas de trabajo acumuladas de 12 tractores. Para cada tractor el 100% de tiempo de uso se divide en 9 categorías correspondientes al producto de 3 rangos de régimen de motor (<1000rpm, 1000-2000rpm, >2000rpm) combinadas con tres rangos de demanda de par (<30% Mmax, 30-50% Mmax, >50% Mmax).



rpm. Los niveles más bajos de consumo específico se alcanzan entre 1450 y 1750 rpm.

Uno de los aspectos destacables de este estudio es la evaluación del nivel de carga al que trabajan los tractores en continuo durante su vida de trabajo, en aquellos modelos que disponen de controlador electrónico del motor (EMR, *Electronic Engine Control*) que ofrece información relativa al régimen del motor, al par, al número de horas de trabajo, etc. Las unidades electrónicas de control del motor (ECUs) se han convertido en una parte estándar de la moderna tecnología de automoción que puede aportar información vital en el análisis de las condiciones de trabajo reales en campo.

En este artículo publicado en 2009, se utiliza el

conector de diagnóstico y un software de comunicación específicos del fabricante para acceder a las distintas ECUs de los tractores, siendo el número de parámetros accesible un aspecto dependiente de las características de cada ECU según modelos.

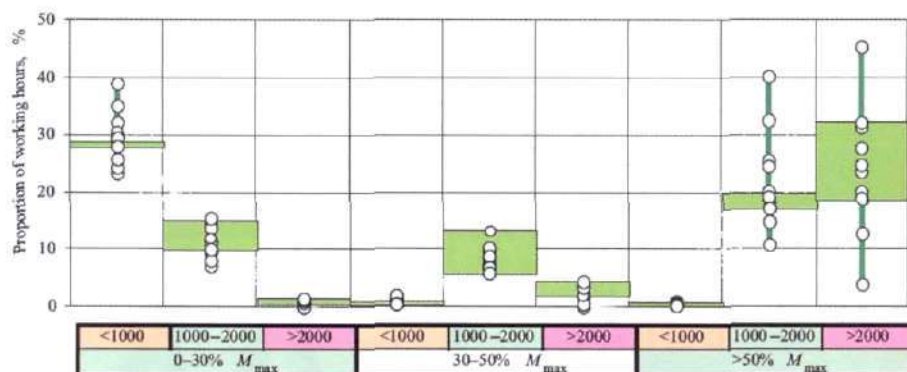
Una vez descargados los datos, el procedimiento de análisis propuesto por Juostas y Janulevicius (2009) consiste en clasificar el porcentaje de horas de utilización en función del régimen del motor (<1000rpm, 1000-2000rpm, >2000rpm) y del porcentaje de par máximo requerido por la labor (<30%, 30-50, >50), de manera que se obtienen en total 9 combinaciones (3 x 3) que pueden expresarse tanto en número total de horas como en porcentaje de horas acumuladas, siendo la suma de las 9 posibilidades el 100% para cada tractor.

La Figura 2 muestra el porcentaje de horas de trabajo correspondientes a cada una de estas 9 situaciones anteriormente mencionadas para los 12 tractores evaluados. Teniendo en cuenta que las condiciones económicas de uso del motor se corresponden con un par superior al 50% del par máximo (M_{max}) y regímenes de motor medios (1000-2000 rpm), el trabajo concluye que en términos generales apenas el 20% del tiempo de uso de los tractores se sitúa en estas condiciones económica y ambientalmente aceptables. Los porcentajes de utilización de los tractores en las zonas aceptables (más de 50% del M_{max} y regímenes 1000-2000 rpm o superiores a 2000 rpm) se sitúa entre el 37 y el 52%, lo que en todo caso indica que más de la mitad del tiempo de uso de todos los tractores evaluados se produce en condiciones poco razonables.

El transporte entre parcelas de trabajo que es una tarea imprescindible puede suponer en torno a un 10 ó 15 % del tiempo total de trabajo del tractor en condiciones de 0-30% M_{max} y regímenes de motor inferiores a 1000 rpm, es decir, condiciones energética y ambientalmente ineficientes. Sin embargo, en este estudio se ha obtenido en todos los tractores evaluados más de un 30% de tiempo total de trabajo en estas condiciones y no ha sido posible mediante encuestas dirigidas a los usuarios, explicar las causas de este hecho. Todo ello indica que existe un amplio margen de mejora, no ya en los motores en sí sino en las condiciones habituales de uso de los mismos que pueden ser tan determinantes como pequeñas variaciones en el óptimo de consumo específico a nivel de diseño en fábrica.

Los datos anteriores pueden resumirse en un gráfico que

Figura 3. Resumen de la variabilidad obtenida por los 12 tractores correspondiente a las 9 condiciones de trabajo consideradas: 3 rangos de régimen de motor (<1000rpm, 1000-2000rpm, >2000rpm) combinadas con tres rangos de demanda de par (<30% M_{max} , 30-50% M_{max} , >50% M_{max}). Fuente: Juostas y Janulevicius (2009).



expresé la dispersión existente entre tractores para las 9 categorías de trabajo definidas por los autores (Figura 3). Esta representación subraya las diferencias existentes en el uso de los tractores a nivel individual y hace si cabe más valiosa la información recogida.

MAPEO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Por otra parte, los espectaculares avances que se han producido en los últimos años en los campos de la electrónica y las tecnologías de la información han simplificado la adquisición de datos relativos a los parámetros de funcionamiento de los tractores en el desempeño de sus labores en campo. El

